

転がり滑り接触下の初期粗さが疲労損傷に及ぼす影響

Effect of initial roughness on pitching in rolling-sliding contact

名工大（院）*光岡 良将, 名工大（院）野田 隆悟, 名工大（学）笠原 嘉人

名工大（正）劉 曉旭, 名工大（正）前川 寛, 名工大（正）糸魚川 文広

Ryosuke Mitsuoka*, Ryugo Noda*, Yoshito Kasahara*, Fumihiro Itoigawa*, Satoru Maegawa *, Xiaoxu LIU*

*Nagoya Institute of Technology

1. はじめに

転がり接触部で生じるマイクロピッチングは必ずしも巨視的なピッチングに至るわけではないが、集積する傾向も見られ巨視的なピッチングの原因となり得る。接触状態の厳しさが表面形状に依存することを考えれば、表面創製時の機械加工の工具軌跡や工具送りなどに起因して生ずる表面の高低差がこの集積する傾向に影響するであろうことは想像に難くない。さらに、初期なじみ時に生ずる塑性変形により導入される欠陥がマイクロピッチングの起点の一つであると考え、表面および表面直下における材料降伏の位置とその拡がりマイクロピッチングの発生とその集積に影響すると考えられる。したがって初期粗さの大きさのみではなく、突起高さ分布や突起ピッチ、さらには表面に働く摩擦力（せん断応力）も影響を及ぼし得る。一方で粗さ突起の高さ分散と塑性指数、および GT モデルにおける無次元粗さパラメータの関係から¹⁾、ある程度の大きさの粗さ突起の高さ分散は粗さオーダーの局所的な塑性変形を生じさせるが最大 Hertz 接触応力を緩和する。すなわち繰り返し応力振幅を減少させる。これより、マイクロピッチング、さらにはその集積により生じる巨視的なピッチングを抑止するためには、初期粗さを含む初期表面形状設計により、塑性変形量と応力振幅の両者を最適化することで達成できる可能性が示唆される。

ここでは、初期表面粗さを極端に変化させて上記の両者の効果を検証し、マイクロピッチングとして現出する疲労損傷の制御を初期粗さで可能であるのかを考察した。

2. 実験装置および実験方法

Figure 1 に四円筒試験機の概略図を示す。本装置は接触面観察および分析のための試験片脱着が容易に可能である。観察対象である試験ローラは、非破壊分析のための解析装置が有する非検査体サイズ上限に収まりやすくするように直径 10 mm と非常に小さく設計している。また、小径のローラでも試験荷重によるアライメントのずれが生じない四円筒方式を採用している。

実験は Table 1 に示す条件で行った。試験ローラと駆動ローラの平均周速が 3.3 m/s になるように試験ローラの回転数は 6000 rpm、駆動ローラの回転数は 1184 rpm でサーボモータにより制御されている。また、任意のすべりを与えることができ、転がり滑り接触を再現できる。一方、二つの支持ローラは試験ローラに連れまわる純転がり接触である。また、支持ローラは幅 3 mm の溝を切り二股にすることで、試験ローラと支持ローラの接触領域が試験ローラと駆動ローラの接触領域と重ならないようにした。

試験ローラおよび駆動ローラは材質がそれぞれ SCM420, SUJ2 でありロックウェル硬さ HRC で 63, 61 である。駆動ローラの表面はエメリー紙で周方向に研磨して二乗平均平方根粗さ R_q で約 $0.2 \mu\text{m}$ になるように調整してある。試験ローラの表面仕上げもエメリー紙で行い、初期粗さの大きいものは R_{zjs} で $2.961 \mu\text{m}$ 、初期粗さの小さいものは R_{zjs} でそれぞれ $0.405, 0.387 \mu\text{m}$ であった。（以降それぞれ粗さ R_{Large} 、粗さ R_{Small_1} 、低粗さ R_{Small_2} と呼称する）

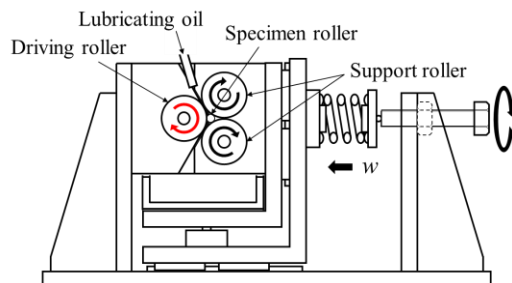


Fig. 1 Four-disk friction tester

Table 1 Experimental conditions

Lubricating oil	ATF		
Surface roughness (R_{zjs}), μm	2.961	0.405	0.387
Minimum oil film thickness, μm	0.055		
Slide-roll ratio, %	-10		
Load, N	940		
Oil temperature	80		

3. 実験結果および考察

試験ローラと駆動ローラの任意の累計接触回数（以下、繰り返し数）ごとに試験を中断して試験ローラを取り外し、触針式粗さ計を用いた断面曲線の測定、レーザ顕微鏡による観察を実施した。各条件における繰り返し数 0 および 10^4 における断面プロファイル曲線を Fig. 2 に、カットオフ長さ $100 \mu\text{m}$ でフィルタ移動平均をとり取得した繰り返し数 0 におけるうねり曲線を Fig. 3 に示す。一般粗さでは繰り返し数 10^4 までに、谷部はほとんど変化せず、突起頂部が大きく変位しているのに対し、低粗さでは形状を維持しつつ、谷部も大きく変位している。繰り返し数 0 における

塑性指数を計算すると R_{Large} , R_{Small_1} , R_{Small_2} の順に 1.95, 0.87, 0.84 となり, R_{Large} を持つ試験片のみが初期に塑性であることがわかる. 一方, 他の 2 つの試験片は塑性指数からの接触状態予測は弾塑性接触であるにも関わらず, 10^4 回の接触で接触中心部付近が大きく塑性変形している. これは, 粗さ突起の高さ分散が小さいため, 理想的な表面での Hertz 接触に近く, そもそも接触中心部付近の応力が高いうえに, うねり形状による接触の局在化が生じ, 摩擦応力も相まって, 表面近傍の塑性変形が促進されたためと考えられる. 特に接触中心付近に凸部うねり形状を有する R_{Small_2} は塑性変形が大きい. この中心部付近のうねり形状を 2 次関数近似により曲率半径として評価し, Hertz 接触応力計算に必要な相対曲率半径に反映させ応力を評価すると, R_{Small_2} は R_{Small_1} 比べ 100MPa 程度接触応力は高いと見積もられる.

次に, 長時間試験後の接触中心付近をレーザ顕微鏡で観察した結果を Fig. 4 に示す (括弧内は繰り返し接触回数を示す). R_{Large} では, 突起オーダでのマイクロピッチングが発生しており, それが集積する傾向を示しているが, その位置は応力振幅が最も高い接触中心ではない. R_{Small_1} , R_{Small_2} では R_{Small_2} のみに激しいマイクロピッチングの集積が生じた. この集積位置は接触中心付近であった. これらの結果から高い粗さ突起部に初期塑性変形が局在化する場合には, 平均的な接触応力によらずマイクロピッチングの発生とその集積が生じるが, 粗さ突起による初期塑性変形の局在化が生じない程度の仕上げ面では, 塑性変形位置とその程度を支配する要因はうねり形状であり, その位置が Hertz 接触応力を作る応力振幅の大きい位置にあると, 激しいマイクロピッチングとその集積が生じ得ると解釈できる.

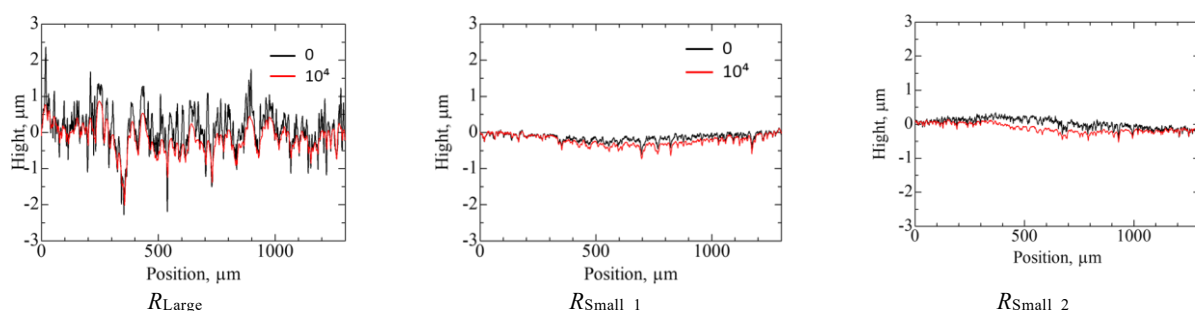


Fig. 2 Cross-sectional profiles

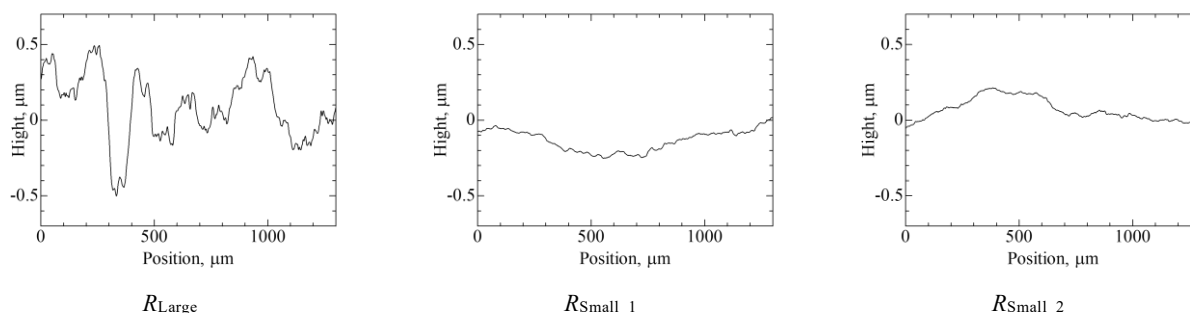


Fig. 3 Waviness Profiles

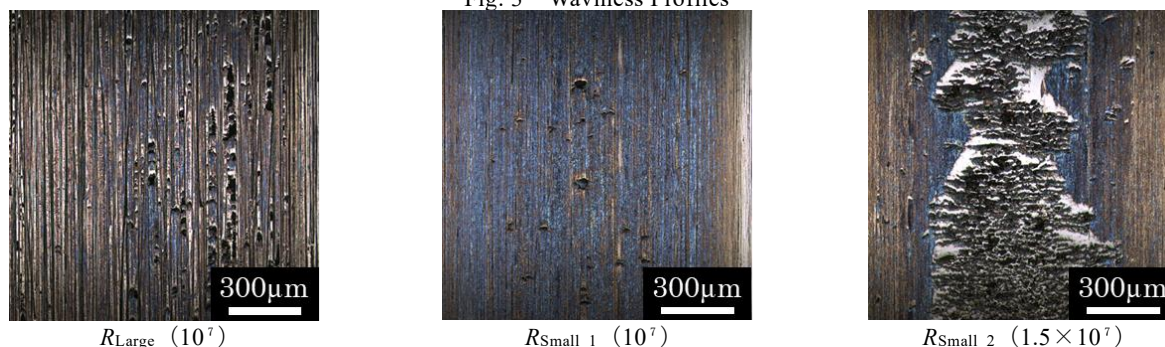


Fig. 4 Observed images with laser microscope

4. 結言

本報では突起ごとに塑性変形する程度の粗さ面と突起の多くが弾性接触する低粗さ面の試験片に対し, 転がり滑り試験を実施した. その結果, 初期粗さが大きければ大きいほどマイクロピッチングが生じやすいわけではなく, 表面仕上げが良くても, うねり形状等により初期塑性変形の局在化が生じると, 応力振幅の大きさによってはマイクロピッチングの発生と集積が激しく生じることが分かった.

文献

- 1) J. A. Greenwood and J. H. Tripp, Trans. ASME, Journal of Applied Mechanics, 34(1967) 153-159.